第41卷 第12期
2024年12月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 41 No. 12
Dec. 2024

荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征及影响因素

李嘉楠[1]， 周成乾[2]， 胡广录[2,3]， 杨鹏华[2]， 李昊辰[2]

（1. 甘肃省水土保持科学研究所，甘肃 兰州 730020；2. 兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州 730070；3. 甘肃省黄河水环境重点实验室，甘肃 兰州 730070）

摘 要： 土壤大孔隙是土壤水分入渗的主要通道，探究荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征及其影响要素，对于区域生态植被恢复和固沙植物的选择具有重要借鉴意义。通过水分穿透实验，研究了黑河中游荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物根区土壤大孔隙特征，分析了土壤大孔隙的影响因素以及大孔隙对土壤饱和导水率的影响。结果表明：（1）土壤大孔隙半径范围在0.5~1.6 mm，大于最小通气孔隙半径0.3 mm，土壤水分运动主要以重力水为驱动力，过渡带固沙植物根区土壤大孔隙呈现出随土层深度增加而减小的趋势，整体表现为小半径孔隙多，大半径孔隙少的特点。（2）土壤容重与除大孔隙总数量外的其他土壤大孔隙特征指标均呈极显著负相关关系；饱和含水率与除土壤大孔隙总数量外的其他大孔隙特征指标均呈显著正相关关系；有机质含量与各土壤大孔隙特征指标均呈极显著正相关关系。（3）土壤饱和导水率在2.32~3.79 mm·min^{-1}，且土壤大孔隙体积比、大孔隙面积比、大孔隙平均半径的4次方和大孔隙总数量分别决定了饱和导水率82%、68%、79%和43%的变异。（4）在研究区相同生境条件下，与裸地相比，固沙植物的栽植能够显著提升土壤水分的渗透能力，固沙植物根区土壤水分渗透能力从强到弱为梭梭、沙拐枣、泡泡刺。

关键词： 荒漠-绿洲过渡带；固沙植物；水分穿透曲线；土壤大孔隙

在我国西北干旱荒漠和绿洲相邻地区存在着一种特殊的景观类型即荒漠-绿洲过渡带，其一侧与绿洲相连，另一侧与荒漠接壤，过渡带植被能够抵御风沙侵蚀，保护绿洲生态系统的稳定，具有重要的生态功能[1-3]。荒漠-绿洲过渡带内生长着许多天然或人工固沙植物，这些固沙植物大多群落结构简单，覆盖度低，具有抗干旱、耐风蚀沙埋等特点[4]。土壤水分含量是植物生长最大的限制因子，影响着固沙植物群落演替的方向和稳定性[5-6]。有研究表明[7]，干旱沙地的灌丛植物通过植物叶片、枝条能将大气降水汇聚到根区土壤，主要通过优先流渗入到土壤中供给植物根系，同时这些优先流通道（大孔隙）的分布也影响着灌丛植物根系对土壤水分的分配和利用。

土壤大孔隙是土壤中较大的物理孔隙，大孔隙作为土壤水分运动的优先通道，能快速地将水分输送到土壤深层或者排入到地下含水层[8]。土壤大孔隙广泛存在于各类土壤中，其形成受土壤质地、动植物活动、干湿交替、冻融作用和耕作等因素的影响，表现出明显的区域特性[9]。很多学者[10-13]基于水分穿透曲线法、染色示踪法、CT扫描技术等方法对土壤大孔隙特征、水分渗透能力等展开了研究。孙程鹏等[14]将单环入渗与染色示踪实验相结合，研究了荒漠绿洲区3种土地利用类型的土壤入渗特征，发现不同土地利用方式会使土壤大孔隙和饱和导水率性质产生显著差异，且土壤质地是影响土壤水分入渗能力的关键因素。黄娟等[15]通过水分穿透曲线测定了花岗岩丘陵区不同利用土地类型的土壤大孔隙特征，土壤大孔隙体积仅占土壤体积不足7%，却能影响稳定出流速率约80%的变异，一些学者[16-17]在其他地区的研究也得出了类似的结论。

目前，关于土壤大孔隙的研究主要集中在降水或灌溉较为充足的地区，对于干旱荒漠沙地土壤大

收稿日期： 2024-04-02； **修订日期：** 2024-08-26
基金项目： 国家自然科学基金项目（41561102，41867074）；甘肃省水利厅水利科学试验研究技术推广项目（甘水建管发[2021]71号）
作者简介： 李嘉楠（1975-），男，高级工程师，研究方向为水土保持生态修复. E-mail: 13919119754@163.com
通讯作者： 胡广录. E-mail: hgl0814@163.com

孔隙特征的研究较少，特别是荒漠-绿洲过渡带土壤大孔隙特征如何？土壤性质对大孔隙的影响如何？大孔隙对水分渗透能力的影响如何？这些都鲜见相关研究文献报道。基于此，本研究以黑河中游荒漠-绿洲过渡带3种典型固沙植物根区土壤为研究对象，通过水分穿透曲线法确定固沙植物根区土壤的大孔隙数量、垂直分布规律，同时结合土壤主要理化性质确定大孔隙特征的影响因素，并分析大孔隙对土壤水分渗透能力的影响。通过探究固沙植物根区土壤大孔隙特征及其影响因素，旨在为荒漠-绿洲过渡带固沙植物的选择和区域生态植被的恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省张掖市临泽县平川镇中国科学院临泽内陆河流域研究站北侧约2 km处的荒漠-绿洲过渡带内，地理位置为100°09′12″~100°09′14″E，39°21′53″~39°22′01″N(图1)。研究区为典型的大陆性荒漠季风气候，干旱少雨，降水集中在6—9月，年降水量约为117 mm，年均蒸发量约为2146 mm，是降水的18倍左右。研究区固沙植物主要有梭梭(*Haloxylon ammodendron*)、泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)、沙拐枣(*Calligonum mongolicum*)、柽柳(*Tamarixr amosissima*)等，植物群落结构相对简单，呈斑块状或带状分布，覆盖度在10%~30%之间，这些固沙植物的生态稳定性较差，在风沙活动的作用下易发生退化。研究区内部的土壤多为风沙土，土壤保水保肥性能差，是固沙植物生长发育的主要限制因素。

1.2 样地设置与样品采集

2023年6—8月在研究区样地(长400 m，宽200 m)

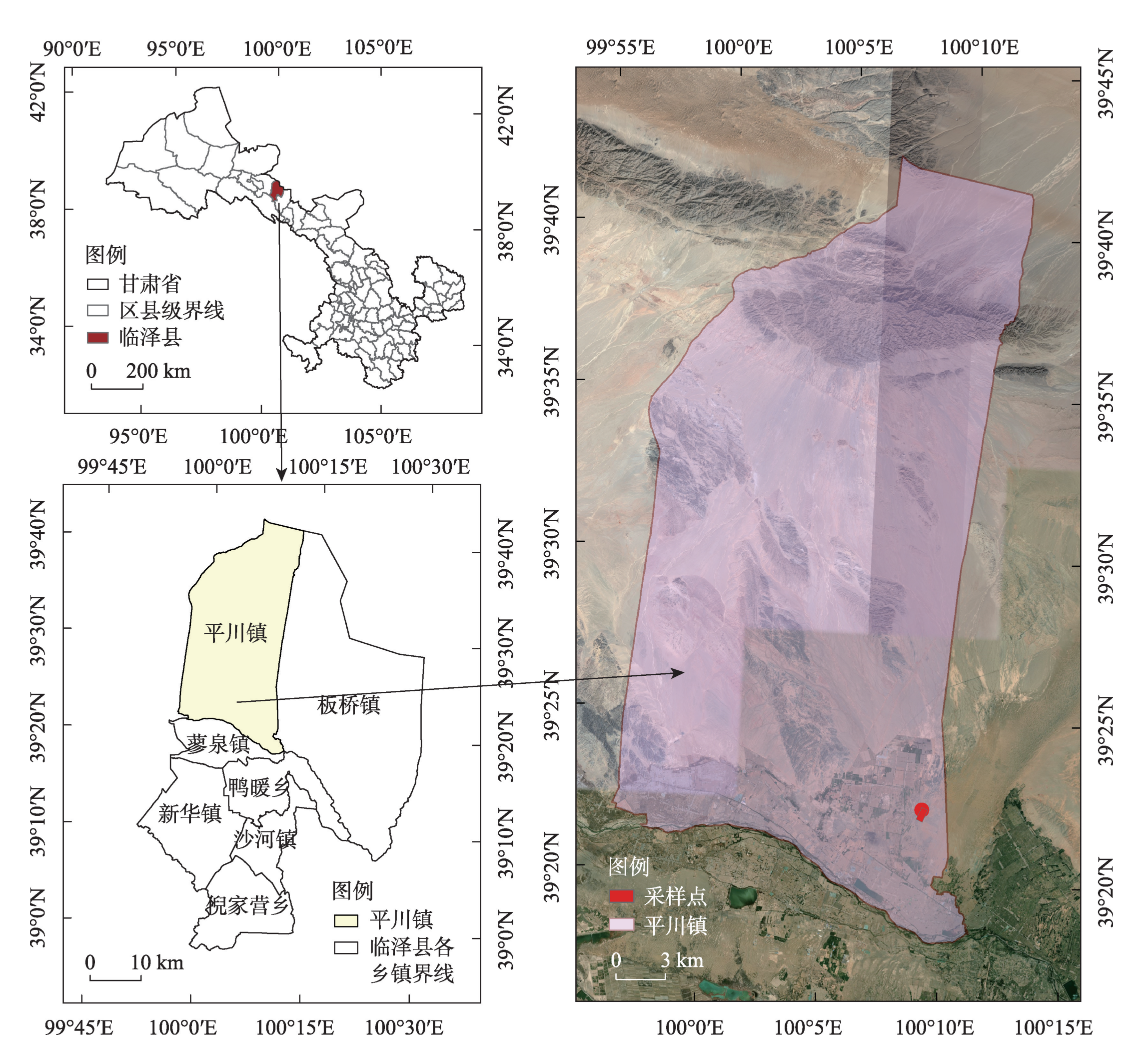


图1 研究区样地位置

Fig. 1 Location of research area

内分别选择生长年限相近、发育情况良好的梭梭、沙拐枣各3株，泡泡刺灌丛沙堆3处，同时选择3块无植物生长的裸地作为对照，固沙植物基本信息如表1所示。选取的3种固沙植物和裸地均不与同种或其他植物存在土壤水分的竞争和相互影响，即选取的固沙植物和裸地周围5 m范围内没有同种或其他植物，这样可以较为真实地反映土壤大孔隙的特征。在野外用环刀法(环刀内径D=5 cm，高h=5 cm)采集距离固沙植物冠幅边缘1 m范围处的根区土壤样品，固沙植物根区土壤样品采集时，在约120°夹角的方向上设置3个采样点，裸地则以所选位置的中心为采样点。样品采集的土层深度分别为0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm、40~50 cm。另外，在采集环刀土样的同时，在环刀取样点旁边约5~10 cm处，按相同的分层方式采集0~50 cm土层的散状土样约200 g，用于测定土壤粒径和土壤有机质。将采集到的原状环刀土样和散状土样分别贴好标签，放入收集箱中，带回实验室进行土壤样品测定。

1.3　测定项目及方法

1.3.1　土壤水分穿透实验　首先将野外采集到的环刀土样放入去离子水中浸泡8~12 h，使环刀土壤水分达到饱和状态；然后将饱和环刀土样置于提前备好的干燥粗砂上静置8~12 h，使环刀土样达到田间持水量；最后将环刀土样按图2所示的装置安装好；再通过马氏瓶向上环刀内注水，保持上环内的液面高度为1.5 cm，同时记录从注水到第1滴水从下环刀流出的时间(初始出流时间)。由于水的密度为1.0 g·cm^{-3}，即1 g水等于1 mL水，故电子秤示数(扣除烧杯重后)为水分出流量变化示数。当第1滴水

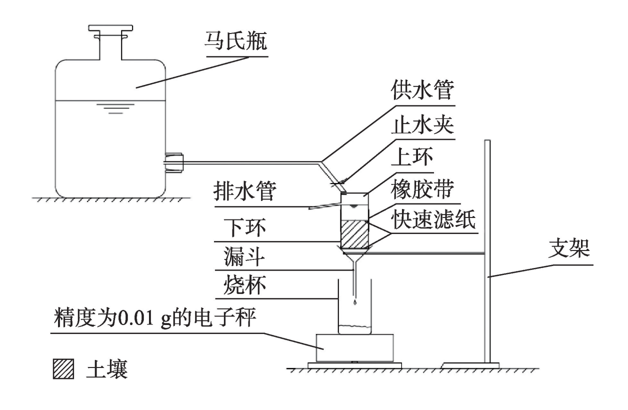


图2　水分穿透实验装置示意图

Fig. 2　Schematic diagram of water penetration curve measurement device

从下环刀流出后，每隔5 s记录1次电子秤的示数，到180 s时停止记录。

1.3.2　土壤大孔隙测定　根据土壤水分穿透实验测定的结果，利用Radulovich等[18]提出的方法计算土壤大孔隙的数量和平均半径。该方法主要为泊肃叶方程和流体在管内流动的稳态水流方程，具体计算公式见文献[19]。由于大孔隙半径范围会随着初始出流时间(向上环内注水到下环第一滴水流出的时间)变化，为使同一固沙植物根区土壤大孔隙半径划分标准相同，文中土壤大孔隙半径和数量特征在计算过程中，先将同一固沙植物根区3个采样点位测得的水分出流量和初始出流时间求平均，然后根据文献[19]的方法计算得出。

大孔隙半径：

$$r = \tau L\left(\frac{8\eta}{\Delta P \times t}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

假设单个大孔隙面积为A (mm^2)，水流速率为

表1　固沙植物基本信息

Tab. 1　Basic information of sand fixing plants

固沙植物种类	编号	冠幅/m	株高/m	造林时间	立地条件(固定沙丘)	采样时间
梭梭(人工)	SS1	2.47±0.23	2.74±0.17	1990—1992年	丘间低地	6月
	SS2	2.63±0.35	2.53±0.21	1990—1992年	丘间低地	7月
	SS3	2.53±0.33	2.87±0.13	1990—1992年	背风坡	8月
沙拐枣(人工)	SG1	2.42±0.22	1.85±0.10	1990—1992年	丘间低地	6月
	SG2	2.93±0.25	2.11±0.15	1990—1992年	丘间低地	7月
	SG3	2.63±0.18	1.96±0.09	1990—1992年	背风坡	8月
泡泡刺(天然)	PP1	3.88±0.29	0.45±0.02	–	丘间低地	6月
	PP2	4.16±0.22	0.51±0.01	–	丘间低地	7月
	PP3	3.95±0.26	0.48±0.02	–	背风坡	8月
裸地	CK	–	–	–	丘间低地	6—8月

注：所有数值均为采样月份同一类型固沙植物3株(堆)测量结果的平均值，冠幅为植物冠幅长轴+短轴的平均值。

v（$mm \cdot s^{-1}$），则大孔隙单位流量 Q（$mm^3 \cdot s^{-1}$）与大孔隙个数 n（个）之间的关系为：

$$Q = nAv = n\pi r^2 \times \frac{\tau L}{\Delta t} \tag{2}$$

变形可得大孔隙个数：

$$n = Q \times \Delta t / \pi r^2 \tau L \tag{3}$$

式中：Q 为对应时间段的出流量（$mm^3 \cdot s^{-1}$）；r 为对应时间段计算出的大孔隙半径的平均值(mm)（如 $r = \frac{r_{t=0\,s} + r_{t=5\,s}}{2}$，其中 t=0 s为初始出流时间，t=5 s为初始出流时间加5 s）；ΔP 为水头压强(Pa)；η 为水的黏滞系数(Pa·s)；τ 为实际水流路径的弯曲系数，取1.2；L 为土柱长度，即环刀土样的高度(cm)；t 为环刀内加水后开始记录的时间(s)；Δt 为划分大孔隙半径区间所对应的时间，文中按0.1~0.5 mm范围划分大孔隙半径区间。

根据上述方法计算出环刀中土壤大孔隙个数 n（个）和平均半径 r(mm)后，再计算大孔隙面积比和体积比。

大孔隙面积比：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^{36}\left(n_i \times \pi \times r_i^2\right)}{\pi \times 25^2} \tag{4}$$

大孔隙体积比：

$$V = \frac{\sum_{i=1}^{36}\left(n_i \times \pi \times r_i^2 \times L \times \tau\right)}{\pi \times 25^2 \times L} \tag{5}$$

式中：S 为大孔隙面积比(%)；V 为大孔隙体积比(%)；36为大孔隙半径范围划分次数(共180 s，从0 s开始记录，每5 s记录一次)；n_i 为第 i 级大孔隙总个数(个)；r_i 为第 i 级大孔隙范围的平均半径(mm)，其中 r_1 为出流时间(下环第一滴水滴下开始记录的时间)在0~5 s的大孔隙半径的平均值，即 $r_1 = \frac{r_{t=0\,s} + r_{t=5\,s}}{2}$；$\tau$ 为实际水流路径的弯曲系数，取1.2；L 为环刀高度，取50 mm；25为环刀内半径(mm)。

1.3.3 土壤主要理化性质指标 土壤含水率采用烘干法测定，温度设定为105 ℃；土壤容重、总孔隙度、饱和含水率采用环刀法测定；测定饱和导水率取水分穿透实验法测定的150~180 s的出流量计算；土壤有机质采用重铬酸钾外加热法测定；采用Mastersizer 3000激光粒度仪测定土壤机械组成。上述每个指标测定3次，取平均值作为该样品的相关指标。土壤相关指标计算公式如下：

土壤容重：

$$\rho_b = \frac{W_3 - W_1}{100\ cm^3} \tag{6}$$

土壤饱和含水率：

$$V_s = \frac{W_2 - W_3}{W_3 - W_1} \times 100\% \tag{7}$$

总孔隙度：

$$V_t = \frac{W_2 - W_3}{100\ cm^3} \times 100\% \tag{8}$$

式中：W_1 为环刀重(g)；W_2 为环刀土样饱和持水量重(g)；W_3 为烘干后环刀土样重(g)；ρ_b 为土壤容重（$g \cdot cm^{-3}$）；V_s 为饱和含水率(%)；V_t 为总孔隙度(%)；100 cm^3 为环刀内容积。

饱和导水率：

$$V_f = \frac{\Delta V}{\Delta t \times \pi r^2} \times 60 \tag{9}$$

式中：ΔV 为水分穿透实验150~180 s的出流量（cm^3）；Δt 为水分穿透实验第150~180 s的时间差(s)；r 为环刀内半径，取25 mm；60为1 min；V_f 为土壤饱和导水率（$mm \cdot min^{-1}$）。

土壤有机质含量：

$$W_O = \frac{\frac{c \times 5}{V_0} \times (V_0 - V) \times 10^{-3} \times 3.0 \times 1.1}{m \times k} \times 1000 \times 1.724 \tag{10}$$

式中：W_O 为土壤有机质含量（$g \cdot kg^{-1}$）；V_0 为空白试验滴定用去浓度为0.2 $mol \cdot L^{-1}$ 的 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 的体积(mL)；V 为土壤样品滴定用去0.2 $mol \cdot L^{-1}$ 的 $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 的体积(mL)；c 为 $\frac{1}{6}$ $K_2Cr_2O_7$ 标准溶液的浓度（0.80 $mol \cdot L^{-1}$）；3.0为碳原子的1/4；1.1为氧化校正系数；m 为风干土壤质量(g)；k 为风干土转化为烘干土系数；1000为将mL转化为L；1.724为土壤有机碳转化为土壤有机质系数。

1.4 数据分析

用Microsoft Excel 2010对数据进行汇总和处理；利用IMB SPSS Statistics 26进行显著性检验分析；利用Origin 2022进行图像绘制和线性拟合。

选择2023年7月采集的土壤样品测定结果进行比较分析。

2 结果与分析

2.1 固沙植物根区土壤水分穿透曲线

对采集的环刀土样进行水分穿透实验，根据出流时间和出流速率(同一植物实测出流速率的平均

值)绘制固沙植物的水分穿透曲线如图3所示。土壤水分出流速率总体上表现为先快速增加、后缓慢增加直至趋于稳定，0~25 s增速较快，25~50 s增速降低，80~100 s基本达到稳定，这说明水分穿透前期水分出流速率主要受到土壤中较大的大孔隙影响，随着水分穿透时间的推移，较小的大孔隙也逐渐参与排水，直至水分出流速率达到稳定状态。

由于固沙植物种类和土层深度的不同，稳定出流速率也表现出明显的差异。如图3所示，不同固沙植物根区土壤水分稳定出流速率整体上表现为梭梭>沙拐枣>泡泡刺>裸地。从不同土层来看，不同固沙植物根区土壤水分出流速率均表现为随着土层深度增加而减小的趋势，稳定出流速率在0.077~0.125 mL·s^{-1}。从加水后到第1滴水流出的时间来看，不同固沙植物各土层之间初始出流时间集中在10~30 s范围内。0~10 cm土层的出流时间在10~15 s之间，其余各土层随深度增加出流时间会增加2~15 s。

2.2 不同固沙植物根区土壤大孔隙特征

2.2.1 不同孔径的土壤大孔隙分布特征 固沙植物根区不同孔径的土壤大孔隙及数量特征如表2所示。从表2可知，不同固沙植物根区土壤大孔隙半径范围在0.5~1.6 mm之间。0~50 cm土层内土壤大孔隙的最大半径均出现在0~10 cm土层，分别为梭梭1.6 mm、沙拐枣1.5 mm、泡泡刺1.4 mm，裸地为1.4 mm，而大孔隙的最小半径为0.5 mm，在各土层均有不同数量的出现。不同固沙植物根区土壤大孔隙总个数在2.99×10^4~4.82×10^{4}个之间，分别为梭梭3.77×10^4~4.82×10^{4}个、沙拐枣3.56×10^4~4.49×10^{4}个、泡泡刺3.19×10^4~4.39×10^{4}个，而裸地为2.99×10^4~3.80×10^{4}个。本研究取土壤大孔隙半径范围的近似中间值(1.1 mm)来区分不同孔径大小，将>1.1 mm的大孔隙称为特大孔隙。研究区不同固沙植物根区土壤中>1.1 mm的特大孔隙仅占大孔隙总数的7.97%，而0.5~1.1 mm的大孔隙占比高达92.03%，说明固沙植物根区土壤表现出较小大孔隙数量较多的特征。例如泡泡刺根区土壤中0.5~0.7 mm的大孔隙数量为1.124×10^{5}个，而>1.1 mm的特大孔隙仅有1.437×10^{4}个。对大孔隙最大半径与土层深度的分析表明，特大孔隙主要出现在上层土壤，这可能与上层土壤受外界因素(风力侵蚀)影响较大有关，而下层土壤一方面受上层土壤保护，另一方面受重

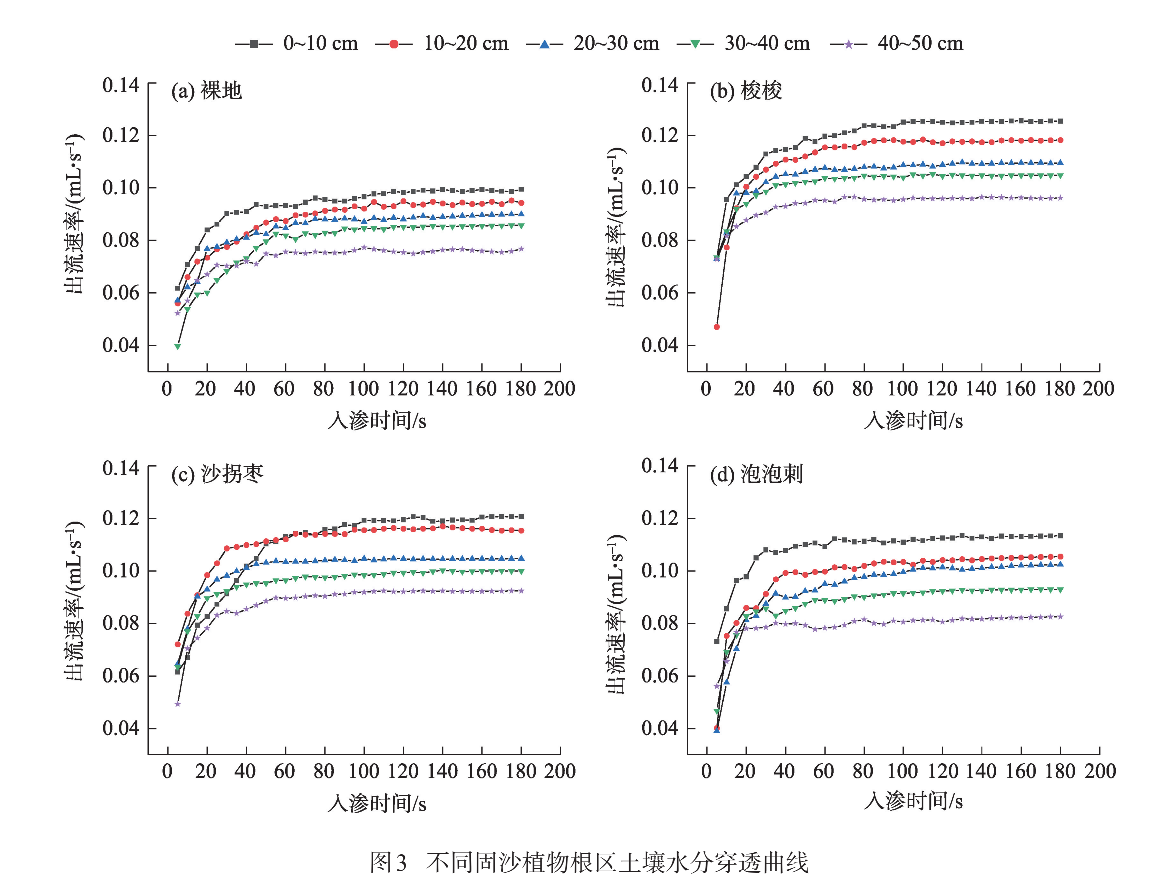


图3 不同固沙植物根区土壤水分穿透曲线

Fig. 3 Soil moisture penetration curves in the root zone of different sand fixing plants

表2 不同固沙植物根区土壤大孔隙半径及数量

Tab. 2 Equivalent pore size and quantity of soil macropores in the root zone of different sand fixing plants

固沙植物类型	土层深度/cm	大孔隙半径范围及数量								大孔隙总数量/(10⁴个·m⁻²)
		半径范围/mm	数量/(10³个·m⁻²)	半径范围/mm	数量/(10³个·m⁻²)	半径范围/mm	数量/(10³个·m⁻²)	半径范围/mm	数量/(10⁴个·m⁻²)	
梭梭	0~10	1.6~1.1	5.94	1.1~0.9	5.09	0.9~0.7	10.91	0.7~0.5	2.63	4.82
	10~20	1.5~1.1	4.43	1.1~0.9	6.10	0.9~0.7	10.39	0.7~0.5	2.48	4.57
	20~30	1.4~1.1	4.32	1.1~0.9	4.72	0.9~0.7	9.52	0.7~0.5	2.41	4.27
	30~40	1.3~1.1	3.04	1.1~0.9	4.45	0.9~0.7	10.39	0.7~0.5	2.31	4.10
	40~50	1.3~1.1	2.82	1.1~0.9	4.09	0.9~0.7	8.51	0.7~0.5	2.23	3.77
沙拐枣	0~10	1.5~1.1	3.65	1.1~0.9	4.49	0.9~0.7	11.51	0.7~0.5	2.53	4.49
	10~20	1.4~1.1	4.34	1.1~0.9	4.85	0.9~0.7	10.06	0.7~0.5	2.54	4.47
	20~30	1.3~1.1	2.99	1.1~0.9	4.40	0.9~0.7	10.32	0.7~0.5	2.30	4.08
	30~40	1.2~1.1	2.74	1.1~0.9	7.25	0.9~0.7	9.67	0.7~0.5	2.20	4.17
	40~50	1.2~1.1	1.55	1.1~0.9	3.71	0.9~0.7	8.99	0.7~0.5	2.14	3.56
泡泡刺	0~10	1.4~1.1	4.31	1.1~0.9	4.75	0.9~0.7	9.80	0.7~0.5	2.50	4.39
	10~20	1.4~1.1	3.79	1.1~0.9	4.38	0.9~0.7	8.99	0.7~0.5	2.33	4.04
	20~30	1.3~1.1	2.33	1.1~0.9	4.03	0.9~0.7	9.70	0.7~0.5	2.26	3.86
	30~40	1.3~1.1	2.50	1.1~0.9	3.66	0.9~0.7	7.96	0.7~0.5	2.15	3.56
	40~50	1.2~1.1	1.44	1.1~0.9	3.46	0.9~0.7	7.00	0.7~0.5	2.00	3.19
裸地	0~10	1.4~1.1	3.70	1.1~0.9	4.01	0.9~0.7	8.42	0.7~0.5	2.08	3.80
	10~20	1.3~1.1	3.24	1.1~0.9	2.63	0.9~0.7	7.96	0.7~0.5	2.08	3.57
	20~30	1.2~1.1	3.38	1.1~0.9	2.66	0.9~0.7	7.77	0.7~0.5	2.08	3.46
	30~40	1.2~1.1	1.96	1.1~0.9	2.26	0.9~0.7	8.14	0.7~0.5	1.99	3.22
	40~50	–	–	1.1~0.9	3.89	0.9~0.7	7.44	0.7~0.5	1.86	2.99

力作用影响表现为紧实、孔隙小的特点。

2.2.2 土壤大孔隙特征指标 不同固沙植物根区土壤大孔隙特征指标如表3所示。不同固沙植物根区土壤大孔隙的平均半径在0.58~0.75 mm之间，其中梭梭为0.62~0.75 mm、沙拐枣为0.60~0.73 mm、泡泡刺为0.59~0.72 mm，而裸地为0.58~0.71 mm。不同固沙植物根区土壤大孔隙面积比在3.19%~8.56%之间，其中梭梭为4.57%~8.56%、沙拐枣为4.11%~7.49%、泡泡刺为3.67%~8.07%，而裸地为3.19%~6.07%。不同固沙植物根区土壤大孔隙体积比在0.39%~0.84%之间，其中梭梭为0.57%~0.84%、沙拐枣为0.50%~0.73%、泡泡刺为0.45%~0.72%，而裸地为0.39%~0.59%。不同固沙植物根区土壤饱和导水率在2.32~3.79 mm·min^{-1}之间，其中梭梭为2.86~3.79 mm·min^{-1}、沙拐枣为2.80~3.61 mm·min^{-1}、泡泡刺为2.55~3.43 mm·min^{-1}，而裸地为2.32~3.10 mm·min^{-1}。由表3可知，同种固沙植物根区不同土层之间土壤大孔隙特征指标均存在显著差异($P<0.05$)，不同固沙植物根区同一土层之间除大孔隙平均半径外，其余土壤大孔隙特征指标均存在显著差异($P<0.05$)。整体来看，在相同生境条件下，相同月份不同固沙植物根区土壤大孔隙特征指标随着土层深度的增加而减小，不同固沙植物之间各土壤大孔隙特征指标从大到小为梭梭、沙拐枣、泡泡刺，而裸地最小。

2.2.3 土壤大孔隙特征指标与土壤主要理化性质的相关性 对固沙植物根区的土壤大孔隙特征指标与土壤主要理化性质进行相关性分析(表4)。结果表明，容重与土壤大孔隙的平均半径、面积比、体积比均呈极显著负相关关系($P<0.01$)，这说明土壤的结构越致密，土壤大孔隙越少，大孔隙在土壤中的占比越小，反之，则越大；总孔隙度与土壤大孔隙的平均半径、面积比呈极显著正相关关系($P<0.01$)；饱和含水率与土壤大孔隙的平均半径、面积比呈极显著正相关关系($P<0.01$)，与体积比呈显著正相关关系($P<0.05$)；有机质含量与各土壤大孔隙特征指标均呈极显著正相关关系($P<0.01$)，说明土壤有机质的存在能够促进大孔隙的形成；而不同径级的土壤颗粒与各土壤大孔隙特征指标之间均呈不显著相关关系。总之，固沙植物栽植后，根区土壤有机质含量增加，土壤大孔隙数量增多、大孔隙平均半径增

表3　不同固沙植物根区土壤大孔隙特征指标

Tab. 3　Characteristics of soil macropore in the root zone of different sand fixing plants

固沙植物类型	土层深度/cm	平均半径/mm	大孔隙面积比/($m^2 \cdot m^{-2}$)	大孔隙体积比/($m^3 \cdot m^{-3}$)	饱和导水率/($mm \cdot min^{-1}$)
梭梭	0~10	0.75±0.04Aa	8.56±0.37Aa	0.84±0.04Aa	3.79±0.18Aa
	10~20	0.75±0.05Aa	8.01±0.30Aa	0.74±0.05Ba	3.57±0.12Ba
	20~30	0.71±0.05ABa	6.78±0.81Ba	0.66±0.02Cab	3.29±0.04Ca
	30~40	0.66±0.06ABa	5.68±0.38Cab	0.65±0.04Ca	3.17±0.06Ca
	40~50	0.62±0.06Ba	4.57±0.18Da	0.57±0.02Da	2.86±0.12Da
沙拐枣	0~10	0.73±0.07Aa	7.49±0.43Ab	0.71±0.04Aab	3.61±0.16Aa
	10~20	0.72±0.07Aa	7.26±0.58Aa	0.73±0.03Aa	3.32±0.20Ba
	20~30	0.65±0.01Aba	5.38±0.07Bb	0.59±0.06BCb	3.15±0.05BCb
	30~40	0.64±0.04ABa	5.04±0.42Bb	0.60±0.04Bab	3.03±0.09CDab
	40~50	0.60±0.02Ba	4.11±0.30Cab	0.50±0.03Cb	2.80±0.11Da
泡泡刺	0~10	0.72±0.05Aa	8.07±0.30Aab	0.72±0.05Ab	3.43±0.11Aab
	10~20	0.71±0.05Aa	7.20±0.06Ba	0.62±0.05Bb	3.26±0.06ABa
	20~30	0.63±0.03ABa	5.03±0.41Db	0.68±0.04ABa	3.21±0.08Bab
	30~40	0.63±0.07ABa	5.95±0.39Ca	0.53±0.02Cbc	2.81±0.05Cbc
	40~50	0.59±0.02Ba	3.67±0.22Ebc	0.45±0.03Cbc	2.55±0.07Db
裸地	0~10	0.71±0.04Aa	6.07±0.15Ac	0.59±0.05Ab	3.10±0.26Ab
	10~20	0.68±0.01ABa	5.15±0.17Bb	0.51±0.03Bc	2.81±0.05ABb
	20~30	0.63±0.03BCa	4.27±0.31Cb	0.44±0.01BCc	2.78±0.07ABc
	30~40	0.59±0.02Ca	5.07±0.10Bb	0.48±0.02Cc	2.63±0.25BCc
	40~50	0.58±0.01Ca	3.19±0.34Dc	0.39±0.03Dc	2.32±0.04Cc

注：同种固沙植物不同土层差异显著用大写字母表示；不同固沙植物同一土层差异显著用小写字母表示。$P<0.05$。

表4　土壤大孔隙特征指标与土壤主要理化性质的相关性

Tab. 4　Correlation between soil macropore characteristics and main physical and chemical properties

大孔隙特征指标	土壤容重/($g \cdot cm^{-3}$)	总孔隙度/%	饱和含水率/%	有机质/($g \cdot kg^{-1}$)	不同径级土壤颗粒(d)		
					$d<0.25$ mm	0.25 mm<d<0.5 mm	$d>0.5$ mm
总数量	−0.425	0.362	0.373	0.666**	−0.105	0.02	0.215
平均半径	−0.840**	0.654**	0.709**	0.790**	0.059	−0.131	0.083
面积比	−0.729**	0.596**	0.632**	0.807**	0.004	−0.084	0.133
体积比	−0.616**	0.444	0.485*	0.891**	0.061	−0.08	0.03

注：**表示显著水平为$P<0.01$；*表示显著水平为$P<0.05$。

大，使得固沙植物根系能够在降雨过程中获得更多的水分补给，有利于固沙植物的存活及生长发育，对维持区域生态稳定起到积极作用。

2.3　固沙植物根区土壤大孔隙特征对土壤饱和导水率的影响

对固沙植物根区各土壤大孔隙特征指标与饱和导水率进行线性拟合(图4)可以看出，土壤大孔隙体积比、大孔隙面积比、大孔隙平均半径的4次方、大孔隙总数量均与饱和导水率呈显著的正相关关系($P<0.05$)。线性拟合方程均为$y=ax+b$形式，R^2分别为0.82、0.68、0.79、0.43。表明固沙植物根区中>0.5 mm的土壤大孔隙体积比决定了饱和导水率82%的变异，大孔隙面积比决定了饱和导水率68%的变异，大孔隙平均半径的4次方决定了饱和导水率79%的变异，大孔隙总数量决定了饱和导水率43%的变异。这些结果说明土壤大孔隙能显著影响土壤水分的运动，大孔隙的数量越多，大孔隙的面积比、体积比越大，土壤的饱和导水率越大，水分入渗能力就越强。

3　讨 论

研究区不同固沙植物根区土壤出流速率均表

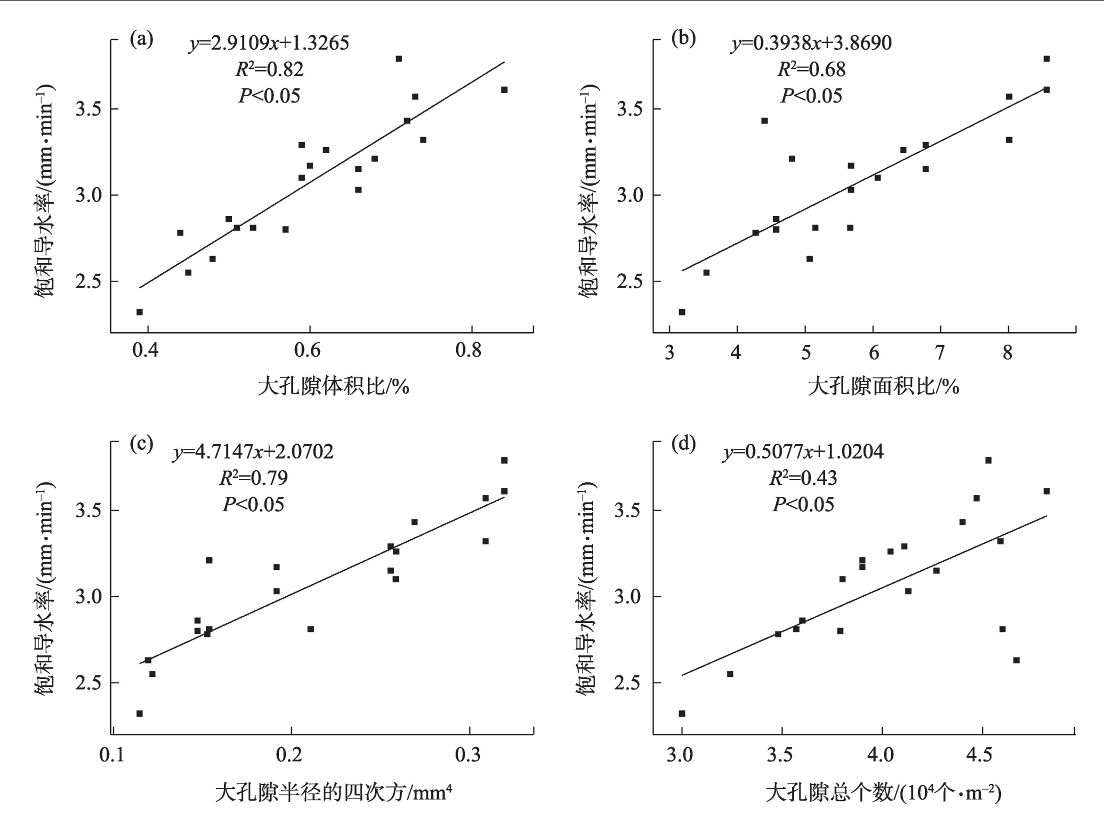


图4 土壤饱和导水率与大孔隙特征指标的相关关系

Fig. 4 Correlation between soil saturated hydraulic conductivity and soil macropore characteristics

现为先快速增加，再增速降低，然后达到稳定，这一结果与石辉等[20]和田香姣等[21]在其他地区的研究结果一致，但与王金悦等[19]对连栽桉树林地土壤出流速率的研究结果有所不同，不同连栽桉树林地土壤出流均表现为先匀速增加后趋于稳定，导致这一现象的原因可能与土壤性质的不同有关。本研究中，水分稳定出流速率还表现出随土层深度增加而减小的特点，虽然3种固沙植物根区土壤的水分稳定出流速率均大于裸地土壤，但3种固沙植物根区土壤的水分稳定出流速率也存在明显不同，这可能与固沙植物种类、根系分布特点、土壤有机质含量等因素的不同有关[22]。

土壤大孔隙特征指标是对土壤中大孔隙数量和分布情况的重要表征，也反映了土壤水分渗透能力的强弱[23]。研究区固沙植物根区土壤大孔隙数量表现为随土层深度增加而减小的趋势，土壤大孔隙主要以半径<1.1 mm的大孔隙为主，>1.1 mm的特大孔隙占比较少，研究表明，固沙植物根区土壤中半径>1.1 mm的特大孔隙数量仅占大孔隙数量的6.81%，而半径在0.5~1.1 mm的土壤大孔隙占比高达93.19%，总体呈现为大半径孔隙少，小半径孔隙多的特点。固沙植物根区土壤大孔隙平均半径的最大值均出现在0~10 cm土层，与金兆梁[24]和吕刚等[23]的研究结果相似。本研究中土壤大孔隙平均半径范围在0.58~0.75 mm之间，最小的大孔隙半径为0.5 mm，大于重力水自由移动的最小孔隙半径0.3 mm[25]，表明研究区土壤水分运动主要以重力为驱动。同时，随着土层深度增加，3种固沙植物根区土壤和裸地土壤中各大孔隙特征指标整体都表现为减小趋势，这与张伟等[25]和敖家坤等[26]的研究结果基本一致，说明随着土层深度的增加研究区固沙植物根区土壤的水分渗透能力会逐层减弱。另外，与裸地作对比，固沙植物的栽植，能显著增加土壤中大孔隙含量，提高固沙植物根区土壤的水分渗透能力，使得冠幅下缘根区土壤容易形成“湿岛”[27]和“肥岛”[28]，有助于固沙植物根系的萌蘖和种子的萌发。因此，加强对过渡带现有固沙植物管理的同时，在裸地区域新植一些固沙植物是防治土壤沙漠化和土地退化的重要措施，既提高了过渡带生态系统的物种丰富度，也可增强过渡带生态系统的稳定性。

土壤性质、造林密度和植物根系数量均会影响

土壤大孔隙的分布特征，进而影响土壤的水分渗透能力[8-9,17]。饱和导水率、土壤容重和孔隙度反映了土壤的压实程度，土壤压实程度越高，其孔隙度越低、透水能力越差[29]。本研究中土壤饱和导水率在2.32~3.79 mm·min^{-1}之间，3种固沙植物根区土壤饱和导水率整体上从大到小为梭梭、沙拐枣、泡泡刺，均大于裸地土壤，这与巩炜等[30]在此地对3种固沙植物根区土壤饱和导水率的研究结果一致。这说明固沙植物的栽植能够显著提升土壤的水分入渗能力，同时也说明固沙植物种类不同，根区土壤孔隙特征不同，土壤饱和导水率也不同。从表4可以看出，土壤容重越大、总孔隙度越小，土壤大孔隙越少，土壤的水分渗透能力也越差。有研究表明，土壤质地对土壤渗透能力的影响显著，砂粒含量越高，水分渗透能力越强[31]。本研究中，3种固沙植物根区土壤和裸地土壤的质地差异不大，但饱和导水率差异较为明显，说明在土壤质地基本一致的地区，饱和导水率还受土壤有机质、土壤颗粒排列方式、植物根系分布等因素的影响。李雪转等[32]关于土壤有机质含量对水分渗透能力影响的研究发现，土壤有机质含量越大，土壤水分渗透能力越强。王彬俨等[33]对北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素进行了研究，结果表明有机质含量增加，土壤大孔隙率也随之增加，土壤水分渗透能力也增强。田昕等[34]和张家明等[35]的研究也表明了土壤有机质能够提高土壤的饱和导水率。本研究中，土壤有机质含量与土壤饱和导水率显著正相关，表明有机质含量增大，土壤大孔隙越多、水分渗透能力越强。综合来看，在研究区土壤质地较为相同的情况下，固沙植物的栽植使得植物根区土壤有机质增多，土壤的团聚作用增强，土壤颗粒越容易形成大的团聚体，土壤孔隙度也随之增大，土壤水分渗透能力也增强。

赵晨光等[36]的研究表明，造林会改善土壤的孔隙结构和土壤的养分含量，造林时间越久的植物，其根系越发达，根区土壤总孔隙数量大、孔隙结构复杂，土壤中有机质含量也越高。也有学者[5,19,34]认为，植被覆盖度与造林密度息息相关，造林密度大，植被覆盖度也随之增大，植被覆盖度大，土壤中植物根系也更丰富，土壤大孔隙也越多，土壤的导水率增大。石辉等[37]的研究发现，植物根系形成的大孔隙，可显著增大土壤的导水能力，也是根系强化土壤渗透能力的实质所在，土壤性质和植物根系、植被覆盖度等因素均会对土壤中大孔隙的形成产生显著影响。因此，在荒漠-绿洲过渡带固沙植物根区土壤大孔隙的后续研究中应增加植物根系和植被覆盖度等因素，明确这些因素对于土壤大孔隙和水分入渗能力的影响，有助于探明土壤大孔隙的形成特点及其与土壤持水能力大小的关系。

在研究区相同生境条件下，本研究所选的3种固沙植物根区土壤饱和导水率均与土壤大孔隙体积比、面积比、大孔隙平均半径的4次方和大孔隙总数量呈正相关关系。说明土壤中大孔隙数量越多、连通性越好，土壤的水分渗透能力就越强[38]。由泊肃叶方程和管内稳态水流方程可知，饱和导水率与圆管半径的4次方成正比。结合本研究，固沙植物根区土壤大孔隙平均半径的4次方决定了饱和导水率79%的变异，而土壤大孔隙总数量只决定了饱和导水率43%的变异，这与王金悦等[19]和孙志祥等[39]研究结果基本一致。大孔隙越多的土壤，深层土壤在雨季便能获得更多的水分，对植物的生长发育起到促进作用，同时也能有效减小降雨径流对土壤的冲刷，降低水土流失的风险。

4 结 论

本文以甘肃省临泽县北部荒漠-绿洲过渡带典型固沙植物梭梭、沙拐枣、泡泡刺为例，通过野外环刀采样、室内土壤水分穿透实验、数据处理，对比分析了研究区相同生境条件下3种固沙植物根区土壤大孔隙特征、土壤饱和导水率及其影响因素，得出如下主要结论：

（1）固沙植物根区土壤大孔隙半径范围在0.5~1.6 mm，其中半径>1.1 mm的特大孔隙仅占大孔隙数量的7.97%，而半径在0.5~1.1 mm的土壤大孔隙占比高达92.03%，呈现出小半径孔隙多、大半径孔隙少的特点；裸地和3种固沙植物根区的各土壤大孔隙特征指标均随土层深度增加呈减小趋势。

（2）固沙植物根区土壤大孔隙特征与土壤性质有关，土壤容重与除大孔隙总数量外的其他土壤大孔隙特征指标均呈极显著负相关关系；饱和含水率与除土壤大孔隙总数量外的其他大孔隙特征指标均呈显著正相关关系；有机质含量与各土壤大孔隙特征指标均呈极显著正相关关系。

（3）固沙植物根区土壤饱和导水率在2.55~3.79 mm·min^{-1}，与裸地（2.32~3.10 mm·min^{-1}）相比固沙植物能够显著提升根区土壤的导水能力。研究区土壤饱和导水率82%、68%、79%和43%的变异分别由土壤大孔隙体积比、大孔隙面积比、大孔隙平均半径的4次方和大孔隙总数量决定，表明土壤大孔隙体积比、大孔隙平均半径的4次方能够明显提升土壤水分的渗透能力。

参考文献（References）：

[1] 王蕙, 赵文智, 常学向. 黑河中游荒漠绿洲过渡带土壤水分与植被空间变异[J]. 生态学报, 2007, 27(5): 1731−1739. [Wang Hui, Zhao Wenzhi, Chang Xuexiang. Spatial variability of soil moisture and vegetation in desert-oasis ecotone in the middle reaches of Heihe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(5): 1731−1739.]

[2] Ji S, Bai X, Qiao R, et al. Width identification of transition zone between desert and oasis based on NDVI and TCI[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 8672−8679.

[3] 魏亚娟, 党晓宏, 汪季, 等. 吉兰泰荒漠绿洲过渡带白刺灌丛沙堆形态示量特征[J]. 干旱区研究, 2023, 40(3): 403−411. [Wei Yajuan, Dang Xiaohong, Wang Ji, et al. Morphological characteristics of *Nitraria tangutorum* nebkhas in Jilantai desert-oasis ecotone[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(3): 403−411.]

[4] Pang Y, Wu B, Jia X, et al. Wind-proof and sand-fixing effects of *Artemisia ordosica* with different coverages in the Mu Us Sandy Land, northern China[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(8): 877−893.

[5] 高君亮, 罗凤敏, 刘泓鑫, 等. 乌兰布和沙漠草方格-灌木林对土壤水分物理性质的影响[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 737−746. [Gao Junliang, Luo Fengmin, Liu Hongxin, et al. Effects of typical ecological projects of desertification combating on soil physical properties in Ulan Buh Desert[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 737−746.]

[6] 李新荣, 马凤云, 龙立群, 等. 沙坡头地区固沙植被土壤水分动态研究[J]. 中国沙漠, 2001, 21(3): 3−8. [Li Xinrong, Ma Fengyun, Long Liqun, et al. Soil water dynamics under sand-fixing vegetation in Shapotou area[J]. Journal of Desert Research, 2001, 21(3): 3−8.]

[7] 王正宁, 王新平. 荒漠灌丛树干茎流及其入渗、再分配特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(5): 1108−1113. [Wang Zhengning, Wang Xinping. Stemflow of *Caragana korshinskii* and its infiltration and redistribution in desert environment[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(5): 1108−1113.]

[8] 孟晨, 牛健植, 骆紫藤, 等. 华北土石山区森林土壤大孔隙对土壤理化性质及根系的响应[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 94−100. [Meng Chen, Niu Jianzhi, Luo Ziteng, et al. Response of soil macropore to soil phychemical properties and root in forest in rocky mountain area of North China[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 94−100.]

[9] 高朝侠, 徐学选, 赵娇娜, 等. 土壤大孔隙流研究现状与发展趋势[J]. 生态学报, 2014, 34(11): 2801−2811. [Gao Chaoxia, Xu Xuexuan, Zhao Jiaona, et al. Review on macropore flow in soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(11): 2801−2811.]

[10] Rab M A, Haling R E, Aarons S R, et al. Evaluation of X-ray computed tomography for quantifying macroporosity of loamy pasture soils[J]. Geoderma, 2014, 213: 460−470.

[11] Tian M, Qin S, Whalley W R, et al. Changes of soil structure under different tillage management assessed by bulk density, penetrometer resistance, water retention curve, least limiting water range and X-ray computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2022, 221: 105420.

[12] 蔡太义, 李玮, 王志刚, 等. 长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1106−1114. [Cai Taiyi, Li Wei, Wang Zhigang, et al. Effects of long-term fertilization on the morphology and quantity of macropores in vertiso[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2022, 39(6): 1106−1114.]

[13] Zhang Z B, Peng X, Zhou H, et al. Characterizing preferential flow in cracked paddy soils using computed tomography and breakthrough curve[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 146: 53−65.

[14] 孙程鹏, 赵文智.土地利用对河西走廊荒漠绿洲区土壤入渗的影响[J]. 中国沙漠, 2021, 41(6): 148−156. [Sun Pengcheng, Zhao Wenzhi. Effect of land use on soil infiltration in the desert-oasis of Hexi Corridor[J]. Journal of Desert Research, 2021, 41(6): 148−156.]

[15] 黄娟, 邓羽松, 马占龙, 等. 桂东南花岗岩丘陵区不同土地利用方式土壤大孔隙特征[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 80−86, 95. [Huang Juan, Deng Yusong, Ma Zhanlong, et al. Characteristics of soil macropores in granite hilly region area with different land use types in Southeast Guangxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 80−86, 95.]

[16] 王伟, 张洪江, 程金花, 等. 四面山阔叶林土壤大孔隙特征与优先流的关系[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1217−1223. [Wang Wei, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, et al. Macropore characteristics and its relationships with the preferential flow in broad leaved forest soils of Simian Mountains[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(5): 1217−1223.]

[17] Iversen B V, Lamandé M, Torp S B, et al. Macropores and macropore transport: Relating basic soil properties to macropore density and soil hydraulic properties[J]. Soil Science, 2012, 177(9): 535−542.

[18] Radulovich R, Solorzano E, Sollins P. Soil macropore size distribution from water breakthrough curves[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989, 53(2): 556−559.

[19] 王金悦, 邓羽松, 李典云, 等. 连栽桉树人工林土壤大孔隙特征

及其对饱和导水率的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(19): 7689-7699. [Wang Jinyue, Deng Yusong, Li Dianyun, et al. Characteristics of soil macropores and their influence on saturated hydraulic conductivity of successive *Eucalyptus* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(19): 7689-7699.]

[20] 石辉, 陈凤琴, 刘世荣. 岷江上游森林土壤大孔隙特征及其对水分出流速率的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(3): 507-512. [Shi Hui, Chen Fengqin, Liu Shirong. Macropores properties of forest soil and its influence on water effluent in the upper reaches of Minjiang River[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(3): 507-512.]

[21] 田香姣, 程金花, 杜士才, 等. 重庆四面山草地土壤大孔隙的数量和形态特征研究[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 292-296. [Tian Xiangjiao, Cheng Jinhua, Du Shicai, et al. Study on number and morphological characteristics of soil macropores in grass land in Simian Mountain of Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(2): 292-296.]

[22] 李松阳, 刘康妮, 余杭, 等. 云南省蒋家沟不同植被类型土壤物理性质对水分入渗特征的影响[J]. 山地学报, 2021, 39(6): 867-878. [Li Songyang, Liu Kangni, Yu Hang, et al. Different vegetation types in the Jiangjia Gully, Yunnan Province, China[J]. Mountain Research, 2021, 39(6): 867-878.]

[23] 吕刚, 王洪禄, 黄龙. 辽西半干旱区森林土壤大孔隙特征研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 176-181. [Lv Gang, Wang Honglu, Huang Long. A study on macropore properties of forest soil in semi-arid region of Western Liaoning Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(5): 176-181.]

[24] 金兆梁. 不同林龄樟子松人工林土壤优先流特征[D]. 阜新:辽宁工程技术大学, 2020. [Jin Zhaoliang. Soil Preferential Flow Characteristics of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* Plantations at Different Forest age[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2020.]

[25] 张伟, 马建刚, 王开德, 等. 滇西南不同土地利用方式坡地土壤大孔隙特征及与饱和导水率的关系[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2023, 51(4): 84-93. [Zhang Wei, Ma Jiangang, Wang Kaide, et al. Characteristics of sloping soil macropores and its relationship with saturated hydraulic conductivity of different land use patterns in South West Yunnan[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2023, 51(4): 84-93.]

[26] 敖家坤, 牛健植, 谢宝元, 等. 土壤大孔隙结构对饱和导水率的影响[J]. 北京林业大学学报, 2021, 43(2): 102-112. [Ao Jiakun, Niu Jianzhi, Xie Baoyuan, et al. Influence of soil macropore structure on saturated hydraulic conductivity[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2021, 43(2): 102-112.]

[27] 尹本丰, 张元明, 娄安如. 灌丛移除对荒漠齿肋赤藓越冬过程中生理生化特性的影响[J]. 植物生态学报, 2016, 40(7): 723-734. [Yin Benfeng, Zhang Yuanming, Lou Anru. Impacts of the removal of vascular plants on physiological and biochemical characteristics of *Syntrichia caninervis* during winter season in a temperate desert[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2016, 40(7): 723-734.]

[28] 余海龙, 樊瑾, 牛玉斌, 等. 灌丛树干茎流与根区优先流对灌丛沙堆"土壤沃岛效应"的影响研究[J]. 草地学报, 2019, 27(1): 1-7. [Yu Hailong, Fan Jin, Niu Yubin, et al. Review on the influence of bushwood stem flow and root-induced preferential flow on the "soil fertile island effect" of nebkha[J]. Acta Agrestia Sinica, 2019, 27(1): 1-7.]

[29] 赵月, 鲍雪莲, 梁超, 等. 压实对农田土壤特性的影响及应对措施[J]. 土壤通报, 2023, 54(6): 1457-1469. [Zhao Yue, Bao Xuelian, Liang Chao, et al. Effects of compaction on farmland soil properties of farms and prevention measures[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(6): 1457-1469.]

[30] 巩炜, 胡广录, 付鹏程, 等. 干旱区荒漠-绿洲过渡带固沙植物的土壤水分入渗特征[J]. 中国沙漠, 2020, 40(5): 200-208. [Gong Wei, Hu Guanglu, Fu Pengcheng, et al. Soil moisture infiltration characteristics of different sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone in arid region of China[J]. Journal of Desert Research, 2020, 40(5): 200-208.]

[31] 胡广录, 刘鹏, 李嘉楠, 等. 黑河中游绿洲边缘三种景观类型土壤水分动态特征及影响因素[J].干旱区研究, 2024, 41(4): 550-565. [Hu Guanglu, Liu Peng, Li Jianan, et al. Characteristics of soil moisture dynamics and influencing factors of three landscape types at the oasis edge in the middle reaches of the Heihe River [J]. Arid Zone Research, 2024, 41(4): 550-565.]

[32] 李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤渗透能力及参数影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 188-190. [Li Xuezhuan, Fan Guisheng. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(3): 188-190.]

[33] 王彬俨, 程金花, 张洪江, 等. 北京市昌平区农地土壤大孔隙形成的影响因素分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(5): 81-86. [Wang Binyan, Cheng Jinhua, Zhang Hongjiang, et al. Factors influencing the macropores properties of agricultural land in Changping District, Beijing[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(5): 81-86.]

[34] 田昕, 赵勇钢, 刘啟霞, 等. 黄土丘陵区长期种植柠条坡地土壤饱和导水率及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2023, 21(4): 20-27. [Tian Xin, Zhao Yonggang, Liu Qixia, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of long-term planting of *Lime strips* on slopes in loess hilly areas[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(4): 20-27.]

[35] 张家明, 徐则民. 马卡山不同植被群落下非饱和带大孔隙流路径示踪试验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2013, 43(6): 1922-1935. [Zhang Jiaming, Xu Zemin. A dye tracer experiment to study macropore flow paths in unsaturated zone under different vegetation communities in Maka Mountain, China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2013, 43(6): 1922-1935.]

[36] 赵晨光, 李慧瑛, 鱼腾飞, 等. 腾格里沙漠东北缘人工植被对土壤物理性质的影响[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1112-1121.

[Zhao Chenguang, Li Huiying, Yu Tengfei, et al. Effects of artificial vegetation construction on soil physical properties in the northeastern edge of Tengger Desert[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1112−1121.]

[37] 石辉, 王峰, 李秧秧. 黄土丘陵区人工油松林地土壤大孔隙定量研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(1): 28−32. [Shi Hui, Wang Feng, Li Yangyang. Quantitative studies on soil macropores under artificial Chinese pine (*Pinus tabuleaformis* Carr.) forest in loess hilly region [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(1): 28−32.]

[38] 屈媛媛, 李梦瑶, 徐学选, 等. 内蒙古地区不同撂荒年限草地与沙棘地的渗透能力比较[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 34−40. [Qu Yuanyuan, Li Mengyao, Xu Xuexuan, et al. Comparison of infiltration capacity between grass land of different time lengths of abandonment and *Sea buckthorn* land in Inner Mongolia[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 34−40.]

[39] 孙志祥, 崔俊芳, 杨汝馨, 等. 横断山区森林土壤饱和导水率传递函数的评价与构建研究[J]. 土壤, 2022, 54(3): 594−601. [Sun Zhixiang, Cui Junfang, Yang Ruxin, et al. Evaluation and construction of pedo-transfer function of saturated hydraulic conductivity of forest soils in Hengduan Mountain Region[J]. Soils, 2022, 54(3): 594−601.]

Characteristics and influencing factors of soil macropores in the root zone of sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone

LI Jianan[1], ZHOU Chengqian[2], HU Guanglu[2,3], YANG Penghua[2], LI Haochen[2]

(1. Gansu Provincial Institute of Soil and Water Conservation Science, Lanzhou 730020, Gansu, China;
2. School of Environment and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China;
3. Key Laboratory of Yellow River Water Environment in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Soil macropores are the main channels for soil moisture infiltration. Investigating their characteristics and influencing factors in the root zone of typical sand-fixing plants in the desert-oasis transition zone is crucial for regional ecological vegetation restoration and plant selection. In this study, we investigated the characteristics of soil macropores in the root zone of these plants in the middle reaches of the Heihe River desert-oasis transition zone through water penetration experiments. We analyzed the influencing factors of soil macropores and their impact on soil-saturated hydraulic conductivity. The results show the following: (1) The radius of soil macropores ranges from 0.5 to 1.6 mm, exceeding the minimum aeration pore radius of 0.3 mm. Soil moisture movement is mainly driven by gravitational water. The density of soil macropores in the root zone of sand-fixing plants in the transition zone decreases with increasing soil depth, characterized by a higher number of smaller pores and fewer larger pores. (2) Soil bulk density and other soil macropore indicators, except for the total number of macropores, showed a highly significant negative correlation. Conversely, saturated water content and other macroporosity indicators, except for the total number of macropores, exhibited a significant positive correlation. Additionally, organic matter content and various soil macropore indicators showed a highly significant positive correlation. (3) The saturated hydraulic conductivity of the soil ranged from 2.32 to 3.79 $mm \cdot min^{-1}$. The variation in saturated hydraulic conductivity was determined by the soil macroporous volume ratio (82%), macroporous area ratio (68%), the fourth power of the average radius of macroporous space (79%), and the total number of macropores (43%). (4) Under the same habitat conditions in the study area, planting sand-fixing plants significantly improved the water infiltration ability of the soil compared to bare land. Among the three sand-fixing plants studied, their water infiltration abilities ranked as follows, from strongest to weakest: *Haloxylon ammodendron*, *Calligonum mongolicum*, and *Nitraria sphaerocarpa.*

Keywords: desert-oasis transition zone; sand fixing plants; water penetration curve; soil macropores